

# AMPLIFICADOR DE POTENCIA DE ENVOLVENTE CLASE-S PARA TRANSMISOR EER

David Tena-Ramos, Francisco Javier Ortega-González, Alejandro Gimeno-Martín, José Manuel Pardo-Martín, etc.

dtena@alumnos.upm.es, ffortega@diac.upm.es, agimenomartin@gmail.com, jmpardo@diac.upm.es  
Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de Ingeniería de Radio, EUIT de Telecomunicación, Carretera de Valencia Km. 7, 28031, Madrid, España

**Abstract-** A Class-S power amplifier for an EER transmitter is shown in this paper. Simulations and measurements on a circuit prototype are presented showing good agreement. The amplifier is based on MOSFET technology both for the power stage and driver. Pulse Width Modulation driving signal required by the amplifier is generated by means of a in-house designed DSP board. Up to 50W output peak power can be delivered to the RF power amplifier (Class-S amplifier load) at 86 % power-added efficiency while harmonic distortion is below 30 dBc and third order intermodulation products remain well below 34 dBc.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los sistemas de comunicación modernos utilizan modulaciones con envolvente no constante, las cuales requieren técnicas de amplificación lineal como por ejemplo los amplificadores de clase A o clase B. Sin embargo, estas técnicas tienen el inconveniente de que consiguen eficiencias muy bajas y conviene conseguir amplificadores de alto rendimiento para aprovechar al máximo la energía de las baterías.

La amplificación clase S fue inventada en 1932 [1] y es una de las múltiples técnicas que consiguen idealmente un rendimiento del 100%. Esta clase de amplificación usa la modulación por anchura de pulso (PWM, Pulse-Width Modulation). La linealidad de este método depende de la habilidad para reaccionar con rapidez frente a cambios en sus entradas. Los pulsos modulados de tensión de salida de los transistores son aplicados a un filtro paso bajo que permite que aparezca en la carga la componente promedio de esa tensión, dando lugar a la señal deseada.

Existen varias aplicaciones donde utilizar esta clase de amplificación. El amplificador propuesto en este documento está integrado dentro de la etapa de amplificación de un sistema transmisor EER (Eliminación y Restauración de Envolvente o Envelope Elimination and Restoration). Esta técnica fue diseñada por Kahn en 1952 [2] para conseguir amplificación de alto rendimiento y lineal.

En un sistema EER la señal de entrada de radiofrecuencia es descompuesta en información de fase e información de amplitud [3]. De esta manera, se puede realizar la amplificación de potencia de alta eficiencia de los dos tipos de información por separado evitando que se produzca distorsión [4]. Posteriormente, la información de amplitud se encargará de modular la información de fase cuyo resultado consiste en restaurar la señal de entrada de radiofrecuencia si ambos tipos de información están sincronizadas.

El amplificador clase S propuesto en este paper será el encargado de amplificar la información de amplitud de la señal compleja de entrada y posteriormente alimentar a otro amplificador de potencia de alto rendimiento en clase E. El diagrama de bloques previsto para este diseño es el mostrado en la Figura 1.

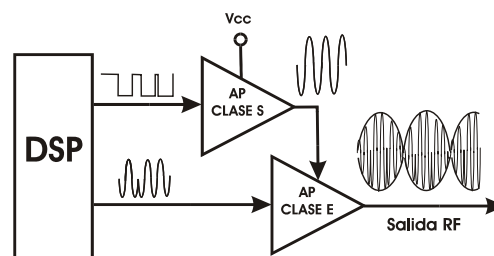


Fig. 1. Diagrama de bloques de una etapa del transmisor EER.

En este documento se presentan los resultados obtenidos para el diseño, simulación y construcción del amplificador clase S diseñado que forma parte de un proyecto realizado por el G.I.R.A. (Grupo de Ingeniería de Radio).

## II. AMPLIFICADOR DE POTENCIA CLASE S

Existen diferentes topologías con las que diseñar un amplificador clase S para señales de audio. En este caso se ha optado por utilizar transistores MOSFET de tal manera que se forme un conmutador medio puente (half-bridge). Este conmutador estará controlado por un “driver” que será el encargado de excitar suficientemente la puerta de los transistores para que se produzca la conmutación de una manera rápida y limpia. La salida de los transistores será aplicada a un filtro paso bajo que dará lugar a la señal deseada.

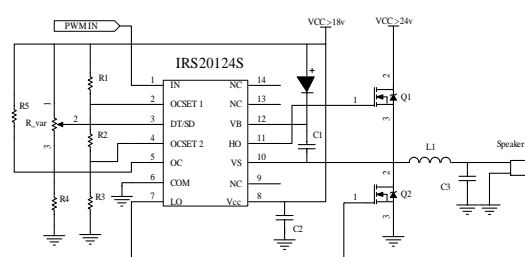


Fig. 2. Amplificador clase S.

El controlador utilizado es el IRS20124 de Internacional Rectifier. Proporciona el nivel de tensión suficiente a las puertas de los transistores para que estos puedan conmutar de estado de conducción a estado de no conducción de la manera más eficiente posible. Sus principales características son:

- Capaz de operar con señales de hasta 1 MHz.
- Permite realizar amplificadores de hasta 100 W de potencia de salida.
- Maneja señales de entrada de PWM de hasta 5 V.
- Tiene una alta inmunidad frente al ruido.
- Permite seleccionar los tiempos muertos.

Los transistores están conectados con el surtidor de uno y el drenador del otro (Half Bridge), de tal manera que cuando el primer transistor conduce a la salida se observa un pulso cuyo nivel es el de la tensión de alimentación y cuando el segundo transistor conduce el nivel de salida es nulo ya que está conectado a masa. Por lo tanto, la salida es una réplica de la señal PWM de entrada pero amplificada hasta el nivel de alimentación. Es muy importante que la resistencia drenador-surtidor en estado de conducción de los transistores sea lo más pequeña posible para que las pérdidas y otros factores indeseados sean mínimos.

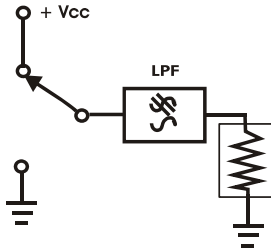


Fig. 3. Conmutador de dos posiciones.

Por último, la tensión de salida se aplica a un filtro paso bajo que es el encargado de que aparezca en la carga la componente promedio de esa tensión, eliminando las componentes de alta frecuencia del PWM. Es importante conseguir que la respuesta en fase del filtro sea constante para la incorporación de este bloque al sistema EER, donde la información de fase y de envolvente deben de estar sincronizadas.

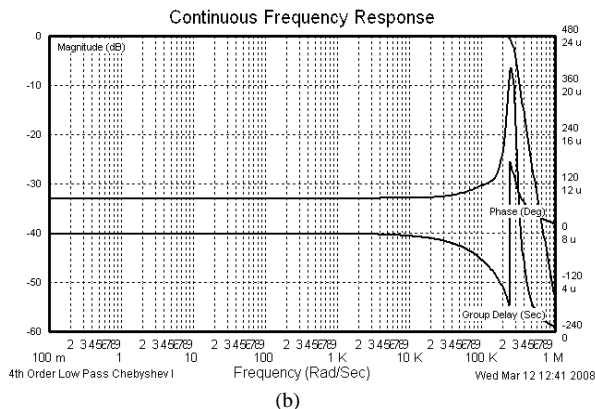
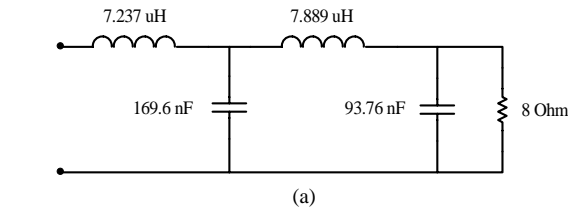


Fig. 4. Filtro paso bajo (a) y respuesta en frecuencia y fase (b).

### III. RENDIMIENTO AMPLIFICADOR CLASE S

La técnica de amplificación clase S tiene idealmente un rendimiento del 100 %. Sin embargo, las pérdidas en activos y pasivos harán que la eficiencia se vea reducida [5]. A continuación se van a comentar algunos de estos efectos:

#### A. Resistencia y tensión de saturación:

La resistencia de saturación es equivalente a una resistencia en serie con la carga lo que provoca una disminución de la tensión de salida y con ello una reducción del rendimiento del dispositivo. Por ello ya se ha comentado anteriormente que esta resistencia debe ser lo más pequeña posible.

#### B. Capacidad de derivación:

En la conmutación de un amplificador clase S aparece una capacidad pequeña en paralelo con la salida. Esta capacidad es debida a las cargas almacenadas en los transistores y a la capacidad del circuito impreso. Cada vez que Q1 entra en conducción la capacidad se carga instantáneamente hasta Vcc. Cada vez que Q2 conduce se disipa la potencia almacenada en esa capacidad.

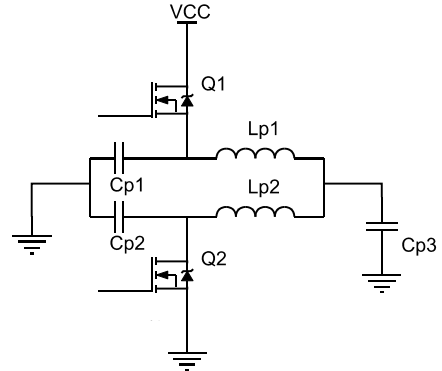


Fig. 5. Elementos parásitos.

Además existen otros efectos parásitos como los terminales de salida que dan lugar a una inductancia en serie de tal manera que se reduce la eficiencia.

#### C. Tiempo de transición:

Los dispositivos reales requieren un tiempo finito para conmutar del estado de conducción al estado de no conducción, y viceversa. Por sencillez, para el análisis se han utilizado modelos en los que los tránsitos se producen en forma de rampa. Si se suponen tensiones y corrientes de transición lineales, la potencia disipada en cada transición depende del tiempo de transición y además de la señal de salida.

### IV. SIMULACIÓN

El siguiente apartado se corresponde con el análisis del amplificador diseñado. En él se van a exponer las simulaciones realizadas con ADS (Advanced Design System) de Agilent Technologies con el fin de optimizar las redes del circuito y prever posibles efectos indeseados, como por ejemplo picos de corriente.

En este capítulo se mostrarán aquellas medidas correspondientes al dominio del tiempo las cuales han ayudado a comprobar que el diseño del circuito se ha realizado correctamente. Se ha dividido la simulación del amplificador en tres fases: la fase de creación de la señal PWM, la de conmutación de los transistores y la de salida mediante el filtro paso bajo.

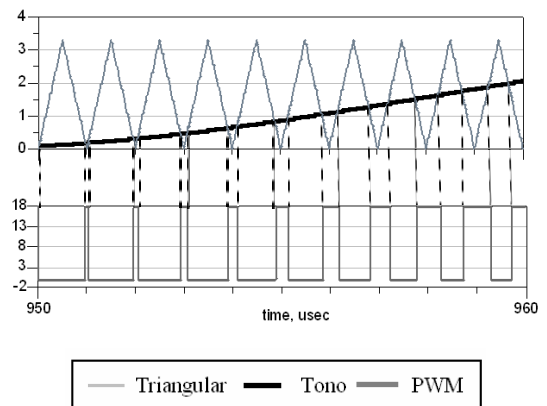


Fig. 6. Creación de la señal PWM.

### A. Modulación PWM:

Uno de los puntos fundamentales del funcionamiento de un amplificador clase S es la manera de ser atacado. En la puerta de los transistores ha de ser vista una señal modulada en PWM. Para realizar la simulación se ha creado un bloque encargado de conseguir este tipo de modulación. La señal de entrada (en este caso cualquier señal de voz) y una onda triangular a la frecuencia de conmutación (será de hasta 1MHz que es lo que soporta el “driver”) se aplican a un comparador. El comparador produce una salida “alta” cuando la señal de entrada es mayor que la onda triangular y una salida “baja” en el caso contrario. El resultado de la creación de la señal de PWM se puede ver en la Figura 6.

### B. Conmutación de los transistores:

La señal en PWM a la entrada del “driver” se encarga de excitar con suficiente tensión la puerta de los transistores. Un nivel “alto” de la señal de PWM significa que el transistor Q1 entrará en estado de conducción mientras que Q2 se encuentra en estado de corte, y al contrario. Esto provoca que a la salida de los transistores se observe la misma señal de PWM de la entrada pero amplificada hasta la tensión de alimentación. Esta situación se puede observar en la Figura 7.

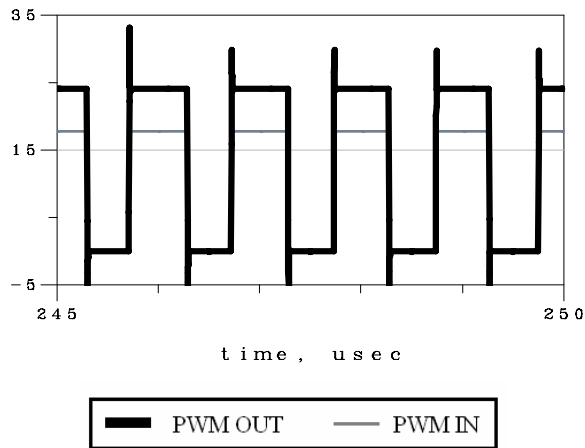


Fig. 7. Comparación de los niveles de PWM a la entrada y a la salida de los transistores.

El hecho que provoca que la eficiencia de este tipo de amplificadores sea tan alta es que no coinciden, idealmente, tensión y corriente al mismo tiempo por lo que no se pierde energía en forma de calor (Figura 8), pero dado que esta situación no es ideal porque los tiempos de transición de un estado a otro no son nulos, la eficiencia del amplificador se ve reducida.

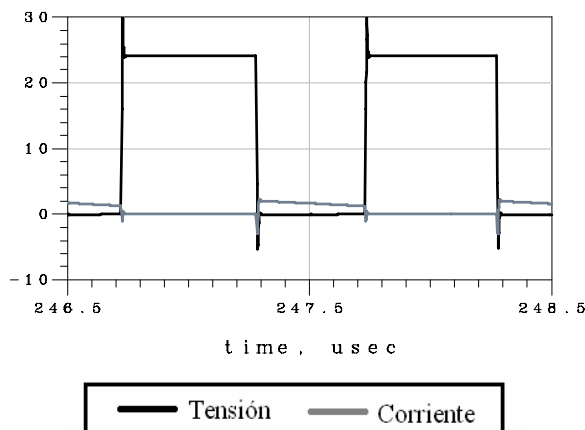


Fig. 8. Desfase entre tensión y corriente en el dispositivo.

### C. Filtro paso bajo de salida:

Dado que este amplificador se diseña para un transmisor EER se ha implementado un filtro cuya respuesta de fase sea constante en la banda de interés. Se probaron diferentes configuraciones y finalmente se optó por un filtro de Chebyshev de orden 4. Está diseñado para que tenga una frecuencia de corte de 225 KHz y una resistencia de carga de 8 ohmios. La función del filtro es hacer que en la carga aparezca idealmente sólo la componente promedio de la señal de PWM de la salida de los transistores.

### V. MEDIDAS

En esta sección se muestran las medidas obtenidas con el montaje del circuito que se muestra en la Figura 9.

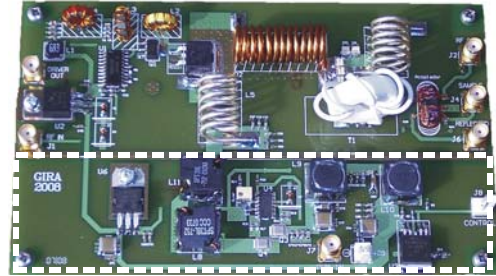


Fig. 9. Placa del amplificador clase S.

Para realizar las medidas se ha generado una señal de prueba PWM por medio de una placa propia basada en el DSP (Digital Signal Processing) ADSP-533 de la familia Blackfin de Analog Devices. El DSP contienen una LUT (Look-up table) con los valores del ancho de pulso correspondientes a la señal de envolvente modulada en PWM. Estos valores se usan para cambiar el ciclo de trabajo de uno de los “timers” a través del cual se genera la señal PWM. En la LUT se puede almacenar cualquier tipo de señal modulada en PWM, si bien para las pruebas la señal modulada tiene una frecuencia de conmutación de 1 MHz y se corresponde con un tono modulado de 6 KHz con el cual se va a mostrar el espectro medido de la señal generada (Figuras 10 y 11).

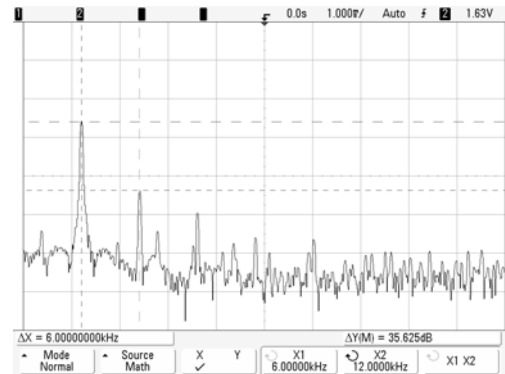


Fig. 10. Espectro medido utilizando un tono de 6 KHz: armónico a 12 KHz.

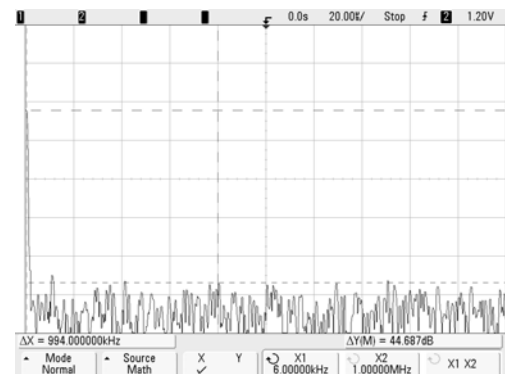


Fig. 11. Espectro medido utilizando un tono de 6 KHz: espurio a 1 MHz.

El nivel de los armónicos está a más de 30 dB por debajo del fundamental. Lo mismo ocurre con la frecuencia de conmutación que se encuentra a más de 40 dB del tono fundamental. En el gráfico de la Figura 12 se puede observar la atenuación sufrida en los armónicos y en la frecuencia de conmutación para diferentes tonos.

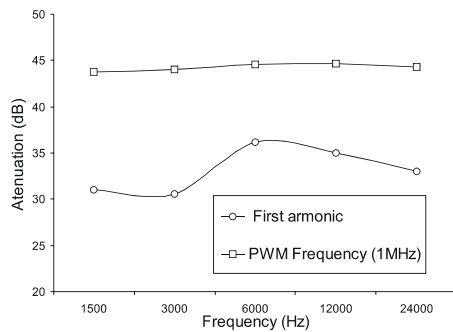


Fig. 12. Medida de la atenuación del primer armónico y de la frecuencia de conmutación respecto al tono fundamental.

La Figura 13 muestra los productos de intermodulación. Para ello la entrada es una señal de dos tonos de 6 KHz y 12 KHz. En la medida del espectro se puede comprobar que a las frecuencias de intermodulación de tercer orden (18 KHz y 30 KHz) quedan atenuadas por debajo de los 34 dB con respecto a la fundamental.

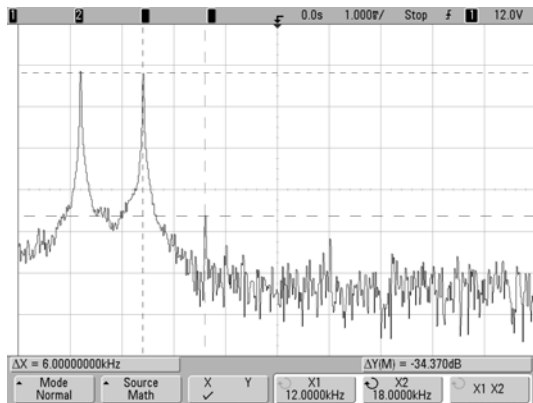


Fig. 13. Productos de intermodulación de tercer orden.

Por último se presenta en la Figura 14 el rendimiento del amplificador en función de la excursión de la señal amplificada. En los datos obtenidos se comprueba que el rendimiento del amplificador es siempre superior al 86 %, correspondiente a tensiones de alimentación bajas, y si trabaja a sus niveles máximos es capaz de alcanzar el 96 %. Con este rendimiento se obtienen potencias de salida de hasta 50 w.

En comparación con los resultados obtenidos en la simulación hay que destacar que el rendimiento disminuye debido a todos los efectos parásitos en activos y pasivos que no se han tenido en cuenta en la simulación. En la Figura 15 se observa el rendimiento obtenido en la simulación y las medidas tomadas sobre el prototipo, para una excursión máxima de la señal amplificada.

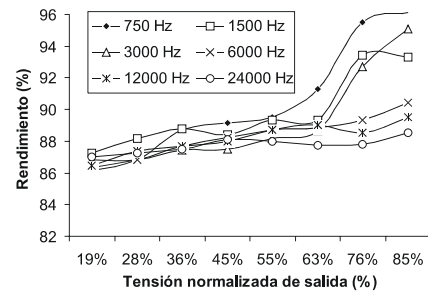


Fig. 14. Rendimiento.

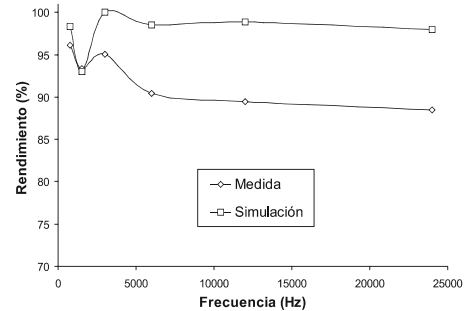


Fig. 15. Comparación del rendimiento simulado y medido.

## VI. CONCLUSIÓN

En este documento se ha mostrado un amplificador de potencia de alto rendimiento clase S con el fin de amplificar una señal de envolvente de un sistema EER. Mediante la observación de los resultados se comprueba que el diseño ha sido realmente efectivo: se ha conseguido un rendimiento superior al 95 % para la máxima excursión de la señal amplificada y mejor que el 86% en cualquier situación, un rechazo de más de 30 dB de los armónicos y la frecuencia de conmutación y un desfase prácticamente constante en la banda de trabajo. Estos resultados permiten ser optimistas en cuanto al ulterior funcionamiento de este dispositivo integrado en un transmisor EER.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto MEC (TEC2006-08210) y la Universidad Politécnica de Madrid.

## REFERENCES

- [1] Krauss, Herbert L., *Solid state radio engineering*, A Wiley Trans- edition, 1983
- [2] L. R. Kahn, *Single-sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration*, Proc. Of the IRE, vol. 40, no. 7, July 1952
- [3] J. Zozaya S., *Aportación a la Linealización de Amplificadores de Potencia Mediante la Teoría de la Hiperestabilidad*, Tesis Doctoral, 2002
- [4] Matthew Higgins, *The Design and Build of a Class 'S' Audio Amplifier*, School of Engineering University of Warwick, 2004
- [5] Ville Saari, Pasi Juurakko, Jussi Ryyänen and Kari Halonen, "13.5 MHz Class- S Modulator for an EER Transmitter", *IEEE, Norchip Conference*, 2004, Proceedings.